

中国机场延误模式动态时空异质性分析

王中一^{1,2}, 张恒才^{1,2}, 王培晓^{1,2}, 於佳宁^{1,2}, 康永伟³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. ESRI(北京)软件研发中心, 北京 100020)

摘要: 延误模式反映了机场之间空间交互关系与特征,已有研究大多聚焦于静态或单一机场延误模式探索,忽视了机场延误的复杂非线性动态变化特点。本文提出机场延误模式动态时空异质性分析框架,通过延误网络构建、 G^* 统计、Mann-Kendall趋势检测、网络节点影响力测度构建PageRankCube模型,对中国247个机场2021年10月约35万条航班记录捕捉进港延误、离港延误、飞行延误3种延误影响力网络的时空异质性模式。研究发现:①机场延误影响力的共性时空模式呈现出“东强西弱”,“南强北弱”,高置信度冷热点多中心聚集,较低置信度冷点分散分布的特点;②京津、长三角、珠三角与成都等大中型国际机场形成连续、增强的高延误时空影响力;东北地区、中部西部地区的中小型机场时空上呈现持续较低的延误影响力;③相较于离港延误网络,进港延误网络在时空分布上展现了更为显著的异质性特征,飞行延误与进港延误两种网络之间的时空异质性表现出较高的相似性;④增强热点型机场不仅具有强大的延误影响力,且易成为引发或传导大面积延误的关键环节;持续冷点型机场呈现出离散边缘化的结构特征,展现出“小世界”的网络特性。本文克服了传统静态延误模式分析的局限性,实现延误模式的动态时空异质性捕捉,为航空管控策略制定提供技术支撑。

关键词: 机场延误;时序延误网络;PageRank;时空异质性;延误模式;中国

DOI: 10.11821/dlxz202502014

1 引言

民航地理学在泛地理信息时代面临巨大机遇与挑战,地理大数据爆发式增长为挖掘地理对象间时空异质模式与空间交互规律,探索人地系统耦合关系提供了重要支撑^[1-2]。航空延误是民航地理学的重要研究命题,也是长期困扰航空运输行业的难点问题,不仅极大影响旅客出行规划,给航司、机场等运营都造成巨大经济损失^[3],且造成的额外燃油消耗与碳排放,更加重了生态环境保护的负担^[4]。此外,延误也是表征机场运行效率的重要指标,随着近年来空中交通需求显著增长,中国机场民用航空运输量不断上升,造成空中交通压力愈发增大,航空系统的复杂性与不确定因素导致航班延误问题愈发凸显^[5]。航空延误本质体现了地理对象间的时空交互作用,反映了机场及其所在城市有关的地理规律,具有显著的时空依赖特征^[6],从时空事件动态演化的角度深入探究机场延误的影响机制,精细挖掘机场延误的时空分布规律与模式,全面析构航空延误时空异质性分布及演化模式对阐明空中交通系统内在规律、运行机制及其动态响应能力具有重要意义^[7-8]。

收稿日期: 2023-11-20; 修订日期: 2024-08-15

基金项目: 中国科学院基础与交叉前沿科研发先导专项(XDB0740100-02-05); 国家博士后创新人才支持计划(BX20230360) [Foundation: The Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, No. XDB0740100-02-05; National Postdoctoral Program for Innovative Talents, No. BX20230360]

作者简介: 王中一(2001-), 山西晋中人, 硕士生, 主要从事时空数据挖掘研究。E-mail: wangzhongyi0010@igsnrr.ac.cn
通讯作者: 张恒才(1985-), 山东济南人, 博士, 副研究员, 主要从事立体时空计算研究。E-mail: zhanghc@icreis.ac.cn

航空网络吸引了民航地理学、交通工程、地理信息科学等众多领域研究与关注,国内外学者开展了大量研究^[9],如从国家或区域层面出发,侧重机场视角进行分析^[10],提出了联系强度模型^[11-12]、图论^[13-14]以及复杂网络理论^[15-16]等多种模型,开展了航空网络的可达性与连通性探讨^[13]、航线网络内部的空间组织模式与结构特征挖掘^[17]、城市网络联系强度的时空演化^[18]、航空空间格局的演变过程^[19]、航空流之间的相互作用机制^[20]、航空网络的可靠性评价^[21]、空中走廊设置与航线优化^[22]等研究。在延误影响因素方面,天气、航空公司、航空管制等是影响延误的关键要素,机场易受恶劣气象条件影响导致容量下降,使得机场容需不平衡造成延误^[23],飞行路线上恶劣气象条件也会增加延误发生的概率^[24],当航班量超过机场终端区保障能力时,地面服务保障资源的限制也会造成航班延误^[25]。交通工程领域对于航空延误问题的研究更注重实际运营层面的影响因素分析、延误模式的识别与挖掘以及优化策略的设计。在延误模式挖掘方面,设计了多种基于航空复杂网络的分析方法^[26],基于张量因子分解的航班延误模式分析框架^[27],基于动态历史观测数据的滑动关联窗口方法^[28],建立延误传播动力学的细粒度视图和动态网络分析方法^[29]等来理解和解释航空延误的内在规律和生成机制。内容上包括分析极端天气事件地区的枢纽机场和机场在延误和取消传播方面的作用^[30],识别机场网络的多层结构^[31],表征空中交通网络中的延迟传播^[32],航班延误的范围和增长趋势^[33],航空运输网络中的航班延误传播推断等^[34]。已有研究成果在探索航空延误现象的空间分布格局、区域差异及其在特定地理环境下的特性提供了一定基础,但机场延误是一个动态地理过程,影响因素多种多样,具有很强的时空依赖特征。航线网络及航空延误方面的研究主要集中在时间成本、影响因素的静态分析及静态模式挖掘上,大多仍局限于单一维度的空间或时间分析。在时空范围上的研究也集中在短时连续尺度,对于长时序下机场网络整体的宏观动态延误模式的提取方法相对有限,对捕捉延误在宏观情景下的动态时空异质性仍鲜有关注。

鉴于此,本文提出一种新颖的PageRankCube模型表征时空延误网络,采用中国机场航班记录大数据构建进港延误、离港延误、飞行延误3种空中交通时序复杂网络,通过延误网络构建、 G_i^* 统计、Mann-Kendall趋势检测、网络节点影响力测度等多个分析,实现从三维时空的视角分析航空延误的动态时空异质性,挖掘不同延误网络的共性与个性。针对不同延误模式机场进行网络结构对比分析,深化对延误特征模式的认知,为航空管理部门精准识别延误模式、优化调度策略和减少经济损失提供技术支撑^[35]。

2 研究数据与方法

2.1 研究区域与数据

本文选取2021年10月1—31日的中国国内机场起降航班数据作为研究数据。研究记录了来自中国境内(暂未含港澳台地区)247个运输机场的约35万条航班信息,涵盖了中国境内所有起飞和降落的航班,数据来源于FlightAware。数据包含了航班的计划起降时间、实际起降时间、起降机场、执飞航司、执飞机型等属性,数据示例如表1所示。本文提取出所有国内航线,以机场作为节点,航线上航班的延误时间为边,将航班数据映射至机场延误网络,最终构建了图1的延误网络结构,该网络清晰展示了机场吞吐量,各机场间的航班连接及对应航线的总延误时长(以分钟计)。

2.2 研究框架

机场延误动态时空异质性分析包括4个关键步骤:①构建离港、进港、飞行3类延误的时序复杂网络;②运用改进的PageRank算法评估网络中的延误影响力,并通过 G_i^* 指标

表1 航班数据示例
Tab. 1 Example of flight data

航班号	航空公司	起飞机场	降落机场	航班机型	日期	计划起飞时间	实际起飞时间	计划着陆时间	实际着陆时间
3U3051	四川航空	广州白云	泸州云龙	A320	2021.10.1	06:45:00	08:22:00	06:56:00	08:33:00
.....									
SZ9998	深圳航空	景德镇罗家	广州白云	A320	2021.10.30	22:20:00	23:30:00	22:20:00	23:51:00

探究单层延误网络的空间显著性模式；

③ 应用 Man-Kandell 趋势检测，建立 PageRankCube，以提取时序延误网络的时空异质性，并观察不同延误模式下延误网络的时空特征；④ 度量具有不同时空模式的节点的网络结构差异，从而实现对机场延误时空模式的挖掘。完整的流程框架如图2所示。

2.2.1 时序延误网络的构建与表达

《航班正常管理规定》（交通运输部令2016年第56号）对航空延误的情形做出了明确规定：“航班（进港）延误”是指航班实际到港挡轮挡时间晚于计划到港时间超过15 min的情况；“航班离港延误”是指航班实际出港撤轮挡时间晚于计划出港时间超过15 min的情况；“航班飞行延误”则是指航班实际飞行时间超过计划飞行时间15 min的情况^[36]。本文将机场 v 作为延误网络的节点， V 作为机场节点的集合，表示延误网络中全部机场节点。

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \quad (1)$$

式中： n 表示机场节点的数量；每个机场 v_i 的地理位置经纬度为 (x_i, y_i) 。

从出发机场 v_i 到到达机场 v_j 的每一架次航班作为网络中的一条有向权重边 $e(v_i, v_j, w_{ij})$ ， E 表示构成有向边的集合。

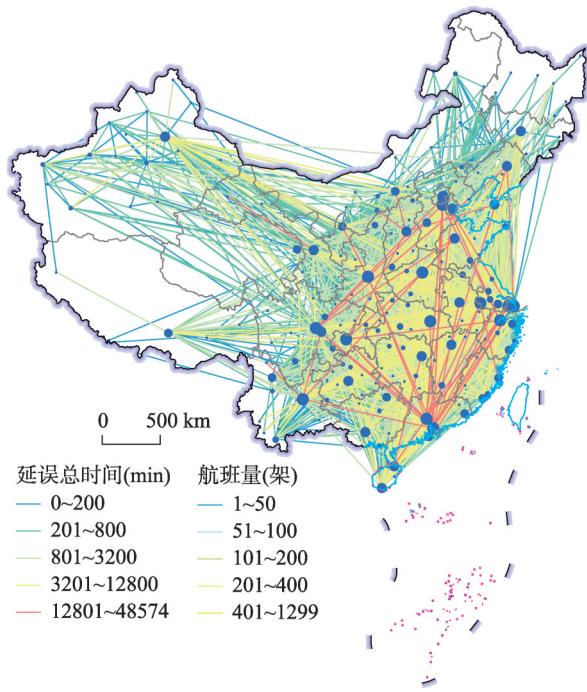
$$E = e(v_i, v_j, w_{ij}) | v_i, v_j \in V \quad (2)$$

式中： v_i 代表始发机场节点； v_j 代表目的机场节点； w_{ij} 代表有向边的权重，表示从机场 v_i 到机场 v_j 的某次航班的延误时间。

通过将机场定义为网络节点，以航班延误作为边的权重，并以天为单位划分时间层，构建时序延误网络。

$$G_i = (V, E) \quad (3)$$

式中： V 代表机场节点集合； E 代表出发机场到目的机场为方向，延误时间为权重的有向权重边集合；在时序上，定义时序上的天数为 M ， $i(1 \leq i \leq M)$ 表示天数索引。



注：基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS (2020)4619号的标准地图制作，底图边界无修改。

图1 研究区民用航空网络
Fig. 1 Civil aviation network in the study area

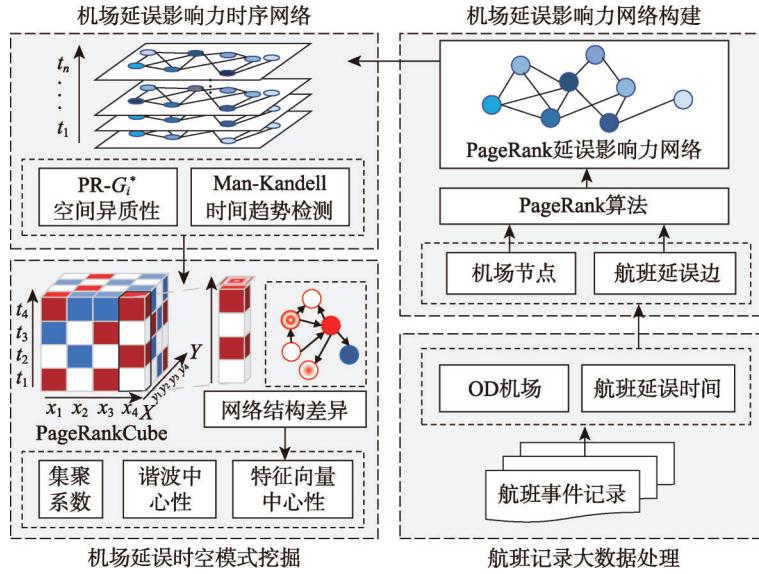


图2 机场延误时空特征分析模型框架

Fig. 2 Airport delay spatiotemporal characteristic analysis model framework

根据进港延误、出港延误、飞行延误3种不同的机场延误情形，最终构成了机场节点与航班进港延误、出港延误、飞行延误的有向权重边构成的3种机场延误网络：到港延误时序网络（Graph of Arrival Delays, G_{ai} ），离港延误时序网络（Graph of Departure Delays, G_{di} ），飞行延误时序网络（Graph of Flight Delays, G_f ）。通过嵌入时间维度，这些多层动态网络不仅突破了传统静态网络连接的局限，精准捕捉了空间实体间的动态交互模式，并且有效区分了不同类型的航空延误网络，为深入理解航空延误现象提供了新颖视角。

2.2.2 延误网络节点影响力的空间显著性测度 为挖掘机场延误网络影响力中呈现的空间显著性，本文设计了一种PageRank- G_i^* (PRG_i^*) 方法，该方法将网络影响力映射至地理空间以识别显著集聚区域，即高延误影响力或低延误影响力的分布模式。在实现上，研究首先计算节点的PageRank值，并定义了邻域 $N(V_i)$ ，表示节点 V_i 周围一定距离内的节点集合。在此基础上，采用距离权重衰减机制，即离 V_i 越远的节点其影响力权重越小。接着，计算该邻域内所有节点的PageRank值的标准差 σ ：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{V_j \in N(V_i)} (PR_j - \mu)^2}{|N(V_i)|}} \quad (4)$$

随后，利用此标准差来计算每个节点的 PRG_i^* 值，公式为：

$$PRG_i^* = \frac{\sum_{j=1}^N (w_{ij} \times PR_j - \overline{PR} \times w_{ij})}{\sigma \times \sqrt{\frac{N \times \sum_{j=1}^N w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^N w_{ij})^2}{N-1}}} \quad (5)$$

式中： w_{ij} 是节点 V_i 到节点 V_j 之间的空间权重； PR_j 是节点 V_j 的PageRank值； \overline{PR} 是邻域内所有节点PageRank值的均值； σ 是标准差； N 是节点的总数量。

2.2.3 PageRank Cube的构建与表达 延误网络节点影响力空间显著性测度方法反映了单层机场延误网络节点影响力的空间异质性，但仍未充分考虑时序网络的时空动态性。为此，针对时序延误网络，引入 Man-Kendall 趋势检测方法，构建 PageRank Cube (PRCube)，如图3所示。PRCube模型定义为一个三维结构 $G_{3D}=(V, E, T)$ ，其中 V 和 E 分别代表机场节点集合和航班延误的有向权重边集合，而 T 表示时间维度，它为每个节点赋予了在不同时间点的状态，对于PRCube的PageRank值的计算，公式为：

$$PR_{A,3D}(i, t) = \left(\frac{1-d}{N} \right) + d \times \sum_{B \in In(A)} \left(\frac{w_{BA}(i, t) PR_{B,3D}(i-1, t)}{\sum_{C \in Out(B)} w_{BC}(i, t)} \right) \quad (6)$$

式中： N 为节点总数； d 为阻尼系数； $PR_{A,3D}(i, t)$ 表示在第*i*天的第*t*个时间点；节点*A*的PageRank值； $w_{BA}(i, t)$ 表示在第*i*天的第*t*个时间点，从节点*B*到节点*A*的边的权重； $In(A)$ 和 $Out(B)$ 分别表示指向节点*A*和从节点*B*出发的边的集合。

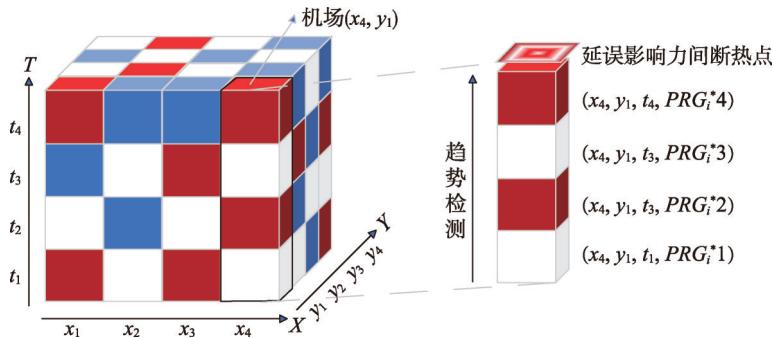


图3 PageRank cube 原理

Fig. 3 PageRank cube principle

PRCube是一个用于分析时序网络数据的PageRank立方体，既考虑了网络拓扑和边权重，又整合了时间维度，使 PRG_i^* 算法能有效处理时序网络数据。在航班延误网络中，PRCube模型可以捕捉到不同时间节点下机场节点之间的相互作用和影响力的变化，从而精确捕捉延误网络在时空维度上的变化趋势。具体地，本文可以定义表2所示不同类型的变化趋势。

2.2.4 不同模式节点网络特征指标 本文在分析整体网络结构后，对具有不同时空模式的节点进行深入比较研究，利用集聚系数、谐波中心性和特征向量中心性等量化网络指标，详尽揭示了由这些特定时空模式节点构成的原始延误网络之间的差异。

(1) 集聚系数($C(v)$)。集聚系数用于衡量网络中节点的局部聚集程度，尤其在有向网络中，它揭示了节点间的相互作用和连接模式。节点*v*的集聚系数 $C(v)$ 定义为：

$$C(v) = \frac{\sum_{u,w \in N(v)} \frac{(e_{uv} + e_{vu})(e_{vw} + e_{wv})(e_{wu} + e_{uw})}{2}}{\deg^{in}(v) \deg^{out}(v) - e_{vv}} \quad (7)$$

式中： $N(v)$ 是节点*v*的邻居节点集合； e_{uv} 是从节点*u*到节点*v*的有向边，如果存在， $e_{uv}=1$ ，否则为0； $\deg^{in}(v)$ 和 $\deg^{out}(v)$ 分别是节点*v*的入度和出度； e_{vv} 是节点*v*的自环（如果存在）。

(2) 谐波中心性($H(v)$)。谐波中心性常用于衡量网络中节点重要性，能够有效处理网络中的不可达路径问题特别适用于航空延误网络。它基于节点间的最短路径距离，考虑到了网络的有向性质。节点*v*的谐波中心性 $H(v)$ 定义为：

表2 时空冷热点的分类
Tab. 2 Classification of cold spots and hot spots

趋势类别	描述语义
未检测到模式	不属于下文中所定义的任何热点或冷点
新增延误冷(热)点	模式最新显著的PRGi*,此前无历史显著记录
连续延误冷(热)点	最近两次连续显著,之前均非显著且最多90%节点未曾显著
分散延误冷(热)点	当前显著的PRG _i *并历史上反复出现达90%,无相反特征
增强延误冷(热)点	长期($\geq 90\%$)显著的PRG _i ,聚类强度总体增加且显著
减少延误冷(热)点	长期($\geq 90\%$)显著的PRG _i ,聚类强度总体减少且显著
振荡延误冷(热)点	最新显著的PRG _i *且曾有相反特性时段,累计显著率 $\leq 90\%$
历史延误冷(热)点	当前非显著的PRG _i *但至少90%时间显著
持续延误冷(热)点	长期($\geq 90\%$)显著的PRG _i ,未见明显趋势变化

$$H(v) = \sum_{u \neq v} \frac{1}{d(u, v)} \quad (8)$$

式中: $d(u, v)$ 是从节点 u 到节点 v 的最短路径长度,如果 u 和 v 之间没有路径,则 $d(u, v)$ 被视为无穷大,其倒数为0。谐波中心性越大,表明节点到网络中其他节点的平均接近程度越高。

(3) 特征向量中心性($x(v)$)。在航空延误网络中,特征向量中心性越大,表明一个高特征向量中心性的机场不仅与多个其他机场有连接,而且这些连接的机场也具有高中心性,表明该机场的延误影响力在网络中占据核心地位。对于有向网络,节点 v 的特征向量中心性 $x(v)$ 可以通过以下方式定义:设 A 为网络的邻接矩阵,其中 A_{ij} 表示节点 i 到节点 j 的有向边的权重。特征向量中心性 x 是 A 的主特征向量,满足方程:

$$Ax = \lambda x \quad (9)$$

式中: λ 是 A 的最大特征值; x 是对应的特征向量; $x(v)$ 是该特征向量中节点 v 对应的分量。

3 延误模式动态时空异质性分析

3.1 机场延误影响力时空共性模式

本文通过构建PRCube模型,旨在揭示机场航班延误现象的时空分布规律。本节将集中分析3种延误时空网络的共性模式。图4展示了2021年10月整月期间中国具有不同时空异质性的各机场的具体表现情况,其中颜色深浅直观反映了各类特征的强弱差异,时空异质性不显著的机场未列出。

(1) 从延误影响力的时空模式分布来看,整体空间格局上呈现出明显的“东强西弱”“南强北弱”的特点。具体而言,延误影响力时空热点主要集中在京津、长三角、珠三角和成渝等航空枢纽地带。与此同时,较为显著的延误影响力时空冷点集中在中部的小型机场,而较低置信度阈值的冷点则散布在东北地区、西南部地区、新疆的中小型机场。机场延误影响力呈现高置信度冷热点多中心聚集,较低置信度冷点分散分布的态势。

(2) 从延误影响力模式的分类出发,“十一”黄金周期间由于航空交通流量的显著增加及复杂多变的气候条件作用下,京津、长三角、珠三角和昆明等大型国际机场所展现的延误影响力出现了明显的增强趋势,并在航空网络中形成了突出的高强度延误时空热点。与此同时,在苏北地区、琼海、陕西以及成渝地区的中大型机场延误影响力高水平集聚现象尤为明显,且表现出稳定的持续性特征;其中南京禄口国际机场、西安咸阳

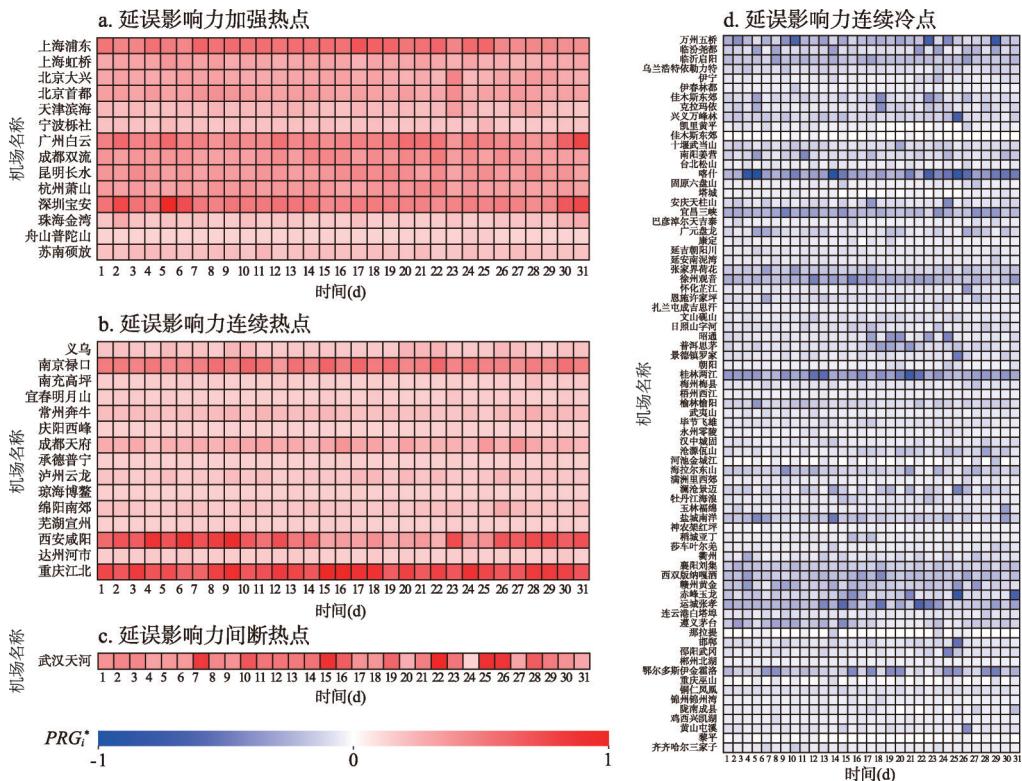


图4 2021年10月中国机场延误影响力时空共性模式

Fig. 4 Spatio-temporal pattern of airport delay influence at Chinese airports in October 2021

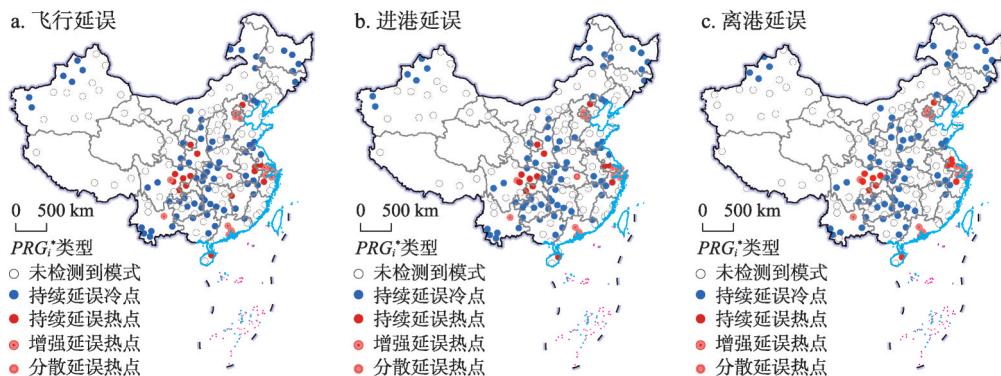
国际机场和重庆江北国际机场，在整个延误网络中的影响力持久维持在较高水平。相比之下，东北部、中部西南部及新疆维吾尔自治区的中小型机场呈现持续低影响力分布，如喀什机场、桂林两江机场因航线结构简单、实际延误率低而体现为低影响力节点。

(3) 从机场特性与延误模式之间的内在联系分析，大型国际机场由于全天候运营及高频航班特性，易引发始发或转接航班延误，并通过连锁反应产生大规模延误集聚效应，在时空范围内形成显著的延误影响力热点。反之，航班流量较小的中小型机场因运营航班少、延误事件频率低，通常在航空网络中表现为延误影响力的时空冷点区域。

3.2 不同延误时空模式对比分析

前文针对3种机场网络延误影响力的共性时空模式展开了分析，本节将进一步针对离港延误网络、进港延误网络以及飞行延误网络各自的时空模式差异进行详细的对比分析，旨在深入揭示各类延误影响力的时空分布特性与差异（图5）。

研究发现，在对比进港与离港延误时空网络时，进港延误网络相比离港延误网络中延误影响力显著偏低的机场多6.5%，具体而言包括喀什机场、莎车叶尔羌机场、徐州观音机场、梅州梅县机场和西双版纳嘎洒机场这些中小型机场，它们通常航班流量较小，故在网络中的延误影响力保持在较低水平。相较之下，进港延误网络中的持续热点机场比离港延误网络多6.6%，分别为庆阳西峰和西安咸阳；同时，扬州泰州机场虽为离港延误网络中的持续热点，但在进港延误网络中并未体现此类特征。值得注意的是，武汉天河机场在进港延误网络中呈现出分散式热点的特点，揭示了该机场进港延误影响力的时间不稳定性较高。总体而言，进港延误网络相较于离港延误网络，显示出更多持续性冷



注: 基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作, 底图边界无修改。

图5 2021年10月中国机场飞行延误、离港延误、进港延误影响力时空模式

Fig. 5 Spatio-temporal patterns of the impact of flight delays, departure delays, and arrival delays at Chinese airports in October 2021

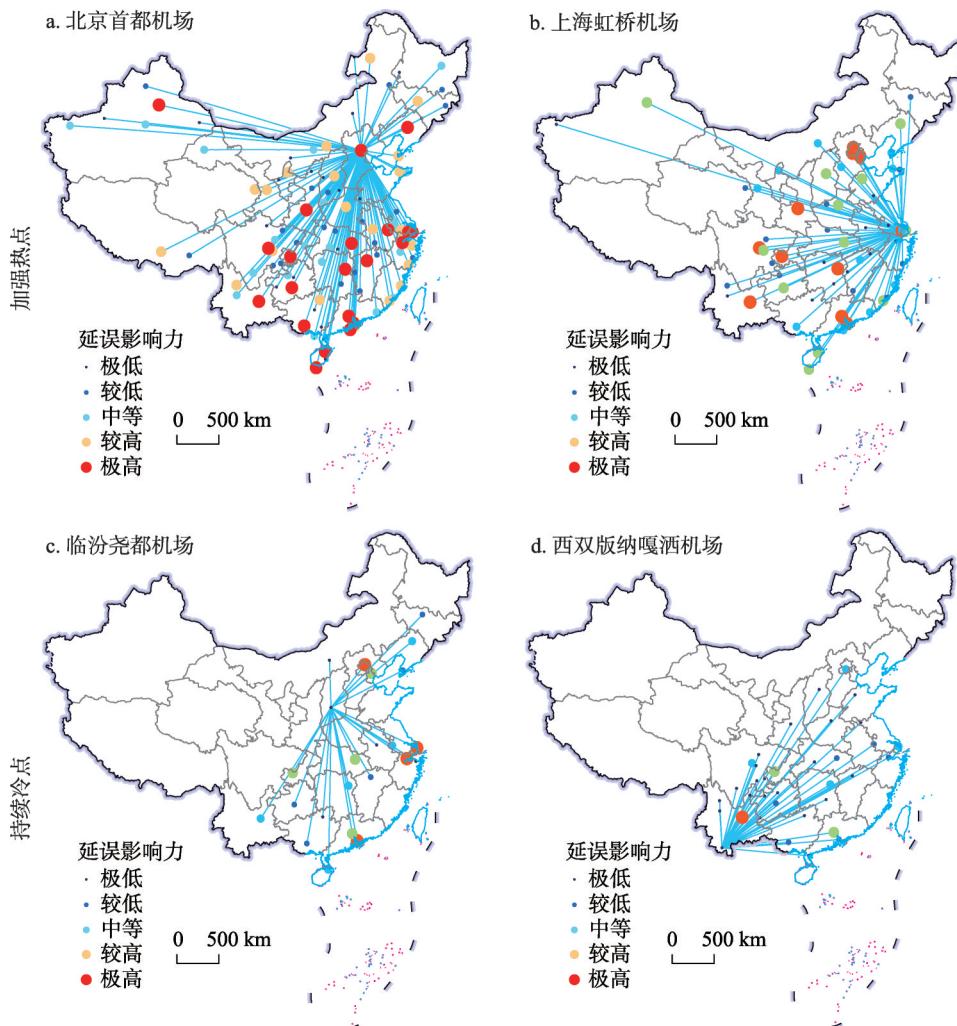
点以及分散型热点, 反映出进港延误网络中部分机场的延误影响力在时间维度上分布更为分散, 并在空间维度上出现了更显著的延误影响力极化现象, 揭示了进港、离港网络中延误影响力的时空异质性和机场间的功能异质性。

在飞行延误时空网络与进港延误时空网络的比较中, 研究发现飞行延误网络中新增芜湖宣州机场和宜春明月山机场为持续热点, 揭示了这些机场的航班在飞行阶段中表现出稳定且显著的高延误影响力。尽管飞行与进港延误网络间的时空影响力模式存在差异, 但两者相似度较高, 这可能由于飞行延误事件相对稀疏, 导致其时空特征与进港延误有一定趋同性。这一结论验证了航空网络内飞行延误与进港延误在时空分布层面具有共同模式特性, 并反映出网络内部延误时空影响力固有共性和动态模式上的相似点。

4 不同冷热点类型网络对比分析

不同类型机场之间的差异本质上源于构成航班延误网络的结构特性。为深入揭示延误影响力的空间变化背后的机理, 本节将对前文识别出的增强型延误影响力热点机场与持续型延误影响力冷点机场进行细致的网络结构对比研究。本文选取北京首都国际机场和上海虹桥国际机场作为强化型延误影响力热点的代表案例; 对于持续低影响力冷点类, 关注了旅游目的地机场及小型支线机场的西双版纳嘎洒机场和临汾尧都机场作为持续低延误影响力典型冷点样本, 所选样本充分体现了各自类型机场在延误问题上的普遍性和独特性(图6)。本文运用集聚系数、谐波中心度以及特征向量中心度等网络分析指标来量化并解析两类不同延误影响力模式机场在网络结构层面的具体差异性。

集聚系数是衡量网络结构中节点相邻体间相互连接紧密程度的指标。结果显示, 北京首都国际机场和上海虹桥国际机场的集聚系数偏低, 这表明它们在机场网络中具有较大的延误影响力辐射范围。相比之下, 西双版纳嘎洒机场和临汾尧都机场分别比北京首都国际机场集聚系数高137.1%与148.9%, 在航班网络中延误影响力辐射范围较小, 呈现出“小世界”的特性。谐波中心性则是一种量化节点在网络整体结构中的相对中心地位的参数, 北京首都国际机场和上海虹桥国际机场的谐波中心性较高, 印证了它们在延误网络中的核心位置; 而西双版纳嘎洒机场和临汾尧都机场的谐波中心性较低, 意味着其在网络中的位置相对边缘化。



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2020)4619号的标准地图制作，底图边界无修改。

图 6 2021年10月中国机场增强热点与持续冷点网络结构差异

Fig. 6 Differences in network structure between enhanced hotspots and persistent cold spots at Chinese airports in October 2021

特征向量中心性作为一种综合考虑节点及其邻居节点中心性的指标，不仅关注节点间的连接数量，还重视连接的质量。结果显示，北京首都国际机场和上海虹桥国际机场的延误影响力特征向量中心性数值较高，显示出它们不仅与其他众多节点相连接，而且对整个延误网络的影响力显著且重要。相比之下，西双版纳嘎洒机场和临汾尧都机场在这项指标上分别比北京首都国际机场低74.78%和53.81%，以及比上海虹桥国际机场低93.95%和74.73%，揭示尽管这些机场也与其他节点相连结，但其所连接的节点在延误网络全局的重要性相对较弱（表3）。

综上所述，通过对包括集聚系数、谐波中心性和特征向量中心性在内的多项网络指标分析，本文揭示了在延误网络中，北京首都国际机场和上海虹桥国际机场作为延误影响力增强热点，不仅具有强大的延误影响力和传播能力，而且在整体连接结构上体现出了关键的价值，在延误网络中的核心地位得到验证。相反地，作为持续冷点的西双版纳

表3 不同模式机场网络结构指标差异

Tab. 3 Differences in airport network structure indicators between different modes

	北京首都国际机场	上海虹桥国际机场	西双版纳机场	临汾尧都机场
集聚系数	0.125	0.614	0.670	0.853
谐波中心性	150.667	127.667	113.333	106.667
特征向量中心性	0.158	0.125	0.072	0.057

嘎洒机场和临汾尧都机场在延误网络中表现出弱功能性并展现出“小世界”网络特性。虽然局部区域存在密集的交互，但在整体网络格局下，它们呈现出离散化及边缘化的结构特征，揭示了持续冷点相较于核心枢纽节点，它们不太可能成为引发或传导大面积延误的关键环节。图5清晰展示了增强热点与持续冷点两种不同类型的机场在延误影响力网络结构上的鲜明对比，直观反映了机场节点从高至低的延误影响力分布变化规律。

5 结论与讨论

本文利用航班记录大数据并基于延误时序多层网络框架，构建了离港延误、进港延误和飞行延误3种不同的机场延误时序网络，提出了一种PageRankCube模型，探索中国机场延误的动态时空异质性模式。基于此，本文揭示了中国机场3种延误网络时空异质性的共性模式与个性差异，对比分析了各类型节点构成的延误影响力网络的结构特征差异。

本文聚焦于3种延误时空网络的共性模式，揭示出延误影响力的显著热点主要分布在京津地区、长三角、珠三角以及成渝城市群等核心区域；同时，在苏北地区、琼海、陝西及成渝地区发现存在持续性的延误影响力热点，东北部、中部西南部地区的中小型机场，新疆维吾尔自治区内的中小型机场以及贵州龙洞堡机场等则表现出较低的延误影响力，形成延误影响力的持续冷点。接着，通过对对比分析3种不同类型的延误网络，发现进港延误网络相较于离港延误网络更易出现持续冷点和分散热点的现象，揭示了进港延误网络在时间维度上更为分散且空间极化效应更为明显的特点。同时，揭示了飞行延误与进港延误在时空模式上显示出一定的相似性和一致性。最后，通过对集聚系数、谐波中心性和特征向量中心性等指标的分析，研究揭示了“增强延误影响力热点”和“持续延误影响力冷点”两种不同时空模式的机场在网络结构上的显著差异。结果显示，可作为“增强延误影响力热点”代表的北京首都国际机场和上海虹桥国际机场这类节点在网络中占据了核心地位，具备强大的延误传播影响力和关键连接价值；而代表“持续延误影响力冷点”的西双版纳嘎洒机场和临汾尧都机场则表现为网络中的离散边缘特性，形成“小世界”的特点，对整体延误网络的影响相对有限。

本文突破了传统静态延误分析框架，通过构建多模式航空延误网络类型，揭示了其空间结构和动态演变规律，为空中交通管理实践提供了理论与实证新视角。研究结果启示，在优化航空网络运行效率以减少延误的过程中，应优先关注和强化对于识别出的“热点”型大中型国际机场的建设和效能提升，如优化调度机制、提高机场吞吐效率等措施，旨在有效遏制此类机场引发的延误事件向整个航空网络的连锁扩散效应；相反地，被识别为“冷点”或影响力不显著的机场则表明其对整体延误网络的影响相对有限。此外，从航空运营管理策略层面考虑，适当调整和优化“热点”类型机场中前后序航班之间的起降间隔时间，以及提高地面服务保障资源利用效率等手段同样有助于减轻航空网络中的延误状况，促进整体航空网络运行效率的提升。未来关于时序复杂网络时空异质

性问题的研究仍需进一步深化和扩展，特别是在方法论层面上，未来应致力于优化时序网络挖掘算法，提高其实用性和稳健性。

参考文献(References)

- [1] Liu Yaolin, Liu Qiliang, Deng Min, et al. Recent advance and challenge in geospatial big data mining. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(7): 1544-1560. [刘耀林, 刘启亮, 邓敏, 等. 地理大数据挖掘研究进展与挑战. 测绘学报, 2022, 51(7): 1544-1560.]
- [2] Liu Yu, Wang Keli, Xing Xiaoyue, et al. On spatial effects in geographical analysis. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(3): 517-531. [刘瑜, 汪珂丽, 邢潇月, 等. 地理分析中的空间效应. 地理学报, 2023, 78(3): 517-531.]
- [3] Peterson E B, Neels K, Barczi N, et al. The economic cost of airline flight delay. *Journal of Transport Economics and Policy*, 2013, 47(1): 107-121.
- [4] Clewlow R, Simaiakis I, Balakrishnan H. Impact of arrivals on departure taxi operations at airports. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. 2010: 7698.
- [5] Tang Z X, Huang S, Han S C. Recent progress about flight delay under complex network. *Complexity*, 2021, 2021(1): 5513093. DOI: 10.1155/2021/5513093.
- [6] Wang Jiaoe, Mo Huihui. Geography of air transportation: Retrospect & prospect. *Progress in Geography*, 2011, 30(6): 670-680. [王姣娥, 莫辉辉. 航空运输地理学研究进展与展望. 地理科学进展, 2011, 30(6): 670-680.]
- [7] Du Yunyan, Yi Jiawei, Xue Cunjin, et al. Modeling and analysis of geographic events supported by multi-source geographic big data. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11): 2853-2866. [杜云艳, 易嘉伟, 薛存金, 等. 多源地理大数据支撑下的地理事件建模与分析. 地理学报, 2021, 76(11): 2853-2866.]
- [8] Mo Huihui, Wang Jiaoe, Gao Chao, et al. Airport agglomeration research: A review and prospect. *Progress in Geography*, 2021, 40(10): 1761-1770. [莫辉辉, 王姣娥, 高超, 等. 机场群研究进展与展望. 地理科学进展, 2021, 40(10): 1761-1770.]
- [9] Mo Huihui, Wang Jiaoe, Huang Jie. Development of China's air transport geography since 2010: A review and prospect. *Human Geography*, 2023, 38(5): 9-15, 35. [莫辉辉, 王姣娥, 黄洁. 2010年以来我国航空运输地理学研究进展与展望. 人文地理, 2023, 38(5): 9-15, 35.]
- [10] Cheung T K Y, Wong C W H, Zhang A M. The evolution of aviation network: Global Airport connectivity index 2006 – 2016. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 133: 101826. DOI: 10.1016/j.tre.2019.101826.
- [11] Jin Fengjun, Wang Chengjin. Hub-and-spoke system and China aviation network organization. *Geographical Research*, 2005, 24(5): 774-784. [金凤君, 王成金. 轴-辐侍服理念下的中国航空网络模式构筑. 地理研究, 2005, 24(5): 774-784.]
- [12] Ye Qian, Wu Dianting, Dai Teqi, et al. A comparative analysis of hierarchy and regional system of domestic air passenger transport network between China and USA. *Geographical Research*, 2013, 32(6): 1084-1094. [叶倩, 吴殿廷, 戴特奇, 等. 中美航空客运网络层次结构和地域系统对比分析. 地理研究, 2013, 32(6): 1084-1094.]
- [13] Hebert B, Murphy E. Evolution of accessibility surface: The case of the domestic United States air transport network// *Proceedings of the Association of American Geographers*, 1971, 2: 75-80.
- [14] Bowen J. Airline hubs in Southeast Asia: National economic development and nodal accessibility. *Journal of Transport Geography*, 2000, 8(1): 25-41.
- [15] Wang Jiaoe, Mo Huihui, Jin Fengjun. Spatial structural characteristics of Chinese aviation network based on complex network theory. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(8): 899-910. [王姣娥, 莫辉辉, 金凤君. 中国航空网络空间结构的复杂性. 地理学报, 2009, 64(8): 899-910.]
- [16] Jiao Jingjuan, Wang Jiaoe. Spatial structure and evolution of Hainan airlines network: An analysis of complex network. *Geographical Research*, 2014, 33(5): 926-936. [焦敬娟, 王姣娥. 海航航空网络空间复杂性及演化研究. 地理研究, 2014, 33(5): 926-936.]
- [17] Mo Huihui, Wang Jiaoe, Huang Jie. Evolutionary configuration of hub airport network in China: A k-core network model experience. *Tropical Geography*, 2018, 38(5): 599-605. [莫辉辉, 王姣娥, 黄洁. 中国枢纽机场网络体系演变格局. 热带地理, 2018, 38(5): 599-605.]
- [18] Li Enkang, Lu Yuqi, Yang Xing, et al. Spatio-temporal evolution on connection strength of global city network based on

- passenger flight data from 2014 to 2018. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(1): 32-39. [李恩康, 陆玉麒, 杨星, 等. 全球城市网络联系强度的时空演化研究: 基于2014—2018年航空客运数据. 地理科学, 2020, 40(1): 32-39.]
- [19] Du Fangye, Wang Jiaoe, Xie Jiahao, et al. Spatial pattern and change of China's international air transport network since the Belt and Road Initiative. *Progress in Geography*, 2019, 38(7): 963-972. [杜方叶, 王姣娥, 谢家昊, 等.“一带一路”背景下中国国际航空网络的空间格局及演变. 地理科学进展, 2019, 38(7): 963-972.]
- [20] Chen Yu, Wang Jiaoe, Jin Fengjun. Robustness and fragility of Chinese air transport network. *Geography and Geo-Information Science*, 2015, 31(3): 59-64, 2. [陈娱, 王姣娥, 金凤君. 中国国内航空网络的可靠性评价. 地理与地理信息科学, 2015, 31(3): 59-64, 2.]
- [21] Wang Jiaoe, Du Delin, Jin Fengjun. Comparison of spatial structure and linkage systems and geographic constraints: A perspective of multiple traffic flows. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(12): 2482-2494. [王姣娥, 杜德林, 金凤君. 多元交通流视角下的空间级联系系统比较与地理空间约束. 地理学报, 2019, 74(12): 2482-2494.]
- [22] Dong Yaqing, Lu Zi, Liu Yuan, et al. The design of China's corridors-in-the-sky and the influence of air routes traffic on the identification of space-time congestion. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(10): 2001-2013. [董雅晴, 路紫, 刘媛, 等. 中国空中廊道划设与时空拥堵识别及其航线流量影响. 地理学报, 2018, 73(10): 2001-2013.]
- [23] Malandri C, Mantecchini L, Reis V. Aircraft turnaround and industrial actions: How ground handlers' strikes affect airport airside operational efficiency. *Journal of Air Transport Management*, 2019, 78: 23-32.
- [24] Schultz M, Lorenz S, Schmitz R, et al. Weather impact on airport performance. *Aerospace*, 2018, 5(4): 109. DOI: 10.3390/aerospace504010.
- [25] Coys. A global model for estimating the block time of commercial passenger aircraft. *Journal of Air Transport Management*, 2006, 12(6): 300-303.
- [26] Wu Xiping, Yang Hongyu, Han Songchen. Analysis of properties and delay propagation of air traffic based on complex network. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(S1): 721473. [武喜萍, 杨红雨, 韩松臣. 基于复杂网络的空中交通特征与延误传播分析. 航空学报, 2017, 38(S1): 721473.]
- [27] Zhang M Y, Chen S W, Sun L J, et al. Characterizing flight delay profiles with a tensor factorization framework. *Engineering*, 2021, 7(4): 465-472.
- [28] Zhou X S, List G F. An information-theoretic sensor location model for traffic origin-destination demand estimation applications. *Transportation Science*, 2010, 44(2): 254-273.
- [29] Cai Q, Alam S, Duong V N. A spatial – temporal network perspective for the propagation dynamics of air traffic delays. *Engineering*, 2021, 7(4): 452-464.
- [30] Bombelli A, Sallan J M. Analysis of the effect of extreme weather on the US domestic air network. A delay and cancellation propagation network approach. *Journal of Transport Geography*, 2023, 107: 103541. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2023.103541.
- [31] Chen S W, Du W B, Liu R R, et al. Finding spatial and temporal features of delay propagation via multi-layer networks. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2023, 614: 128526. DOI: 10.1016/j.physa.2023.128526.
- [32] Li Q, Jing R Z. Characterization of delay propagation in the air traffic network. *Journal of Air Transport Management*, 2021, 94: 102075. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2021.102075.
- [33] Tang Z X, Huang S, Zhu X P, et al. Research on the multilayer structure of flight delay in China air traffic network. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2023, 609: 128309. DOI: 10.1016/j.physa.2022.128309.
- [34] Chen G, Fricke H, Okhrin O, et al. Flight delay propagation inference in air transport networks using the multilayer perceptron. *Journal of Air Transport Management*, 2024, 114: 102510. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2023.102510.
- [35] Rosenow J, Michling P, Schultz M, et al. Evaluation of strategies to reduce the cost impacts of flight delays on total network costs. *Aerospace*, 2020, 7(11): 165. DOI: 10.3390/aerospace7110165.
- [36] State Council of the People's Republic of China. *Regulations on Flight Normality Management* (2016). *Gazette of the State Council of the People's Republic of China*, 2016(28): 22-31. [中华人民共和国国务院. 航班正常管理规定(2016). 中华人民共和国国务院公报, 2016(28): 22-31.]

Analyzing dynamic spatiotemporal heterogeneity in Chinese airport delay patterns

WANG Zhongyi^{1,2}, ZHANG Hengcai^{1,2}, WANG Peixiao^{1,2},
YU Jianing^{1,2}, KANG Yongwei³

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information Systems, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. ESRI (Beijing) Software Research and Development Center, Beijing 100020, China)

Abstract: Flight delay reveals important spatial interaction patterns and could offer crucial insights into the unique characteristics of airports. Existing studies mainly focus on identifying static or individual airport delay patterns, but neglecting the complex nonlinear dynamics involved. To fill the gap, this study proposes a novel methodology to explore the variations in airport delays, considering both temporal changes and spatial differences. We develop a new PageRankCube model that adopts multiple technologies, such as delay network generation, Gi* statistics, Mann-Kendall trend identification, and network node effect measurements. Three types of flight delay networks, including arrival delays, departure delays, and flight delays, are constructed to discover spatiotemporal variability patterns, utilizing a dataset of approximately 350,000 flight records from 247 airports in China. The results show that: (1) Airport delays have a greater impact in eastern and southern China, but less influence in western and northern China. Strong cold and hot spots are grouped in several locations, whereas weak cold spots are distributed. (2) Large international airports in Beijing, Tianjin, the Yangtze River Delta, the Pearl River Delta and Chengdu have formed a continuous and enhanced high delay spatial influence; small and medium-sized airports in the Northeast, Central and Western regions have shown a continuous low delay influence in time and space. (3) Compared with the departure delay network, the arrival delay network shows more significant heterogeneity in spatio-temporal distribution. The spatio-temporal heterogeneity between the flight delay and arrival delay networks shows higher similarity. (4) Enhanced hotspot airports can cause or transmit large-scale delays, while continuous cold spot airports have discrete and marginalized structural characteristics, resembling a "small world" network. This work addresses the constraints of conventional static delay pattern analysis, captures the changing spatial and temporal variations in delay patterns, and offers technical assistance in developing aviation control techniques.

Keywords: airport delays; temporal delay networks; PageRank; spatiotemporal heterogeneity; delay patterns; China